

Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на примере сильнейших землетрясений XXI столетия

А. С. Закупин, Н. В. Богинская

Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН, 693022, г. Южно-Сахалинск, ул. Науки, 1Б,
e-mail: a.zakupin@imgg.ru

Поступила в редакцию 11.04.2022 г., принята к печати 20.07.2022 г.

Объект исследований. Представлены результаты ретроспективного прогноза восьми сильнейших землетрясений мира XXI в. (с магнитудой больше 8) методом LURR. Для расчетов применена авторская методика обработки данных, которая успешно прошла апробацию при исследовании сейсмичности о-ва Сахалин. Одно из главных преимуществ методики – фиксированные (базовые) для всех расчетов параметры математической обработки и выборка расчетных землетрясений (геометрия области расчета и магнитуда). Это позволяет получать прогнозы в реальном времени, а не только проводить ретроспективный анализ. В данном исследовании во всех случаях использовался сейсмический каталог Геологической службы США (United States Geological Survey – USGS). *Результаты.* Для четырех из рассмотренных землетрясений выявлены предвестники в виде аномалий параметра LURR, которые проявляли себя в периоды от 6 мес. до 2 лет перед землетрясением, что согласуется с нашими результатами по Сахалину. При этом в трех случаях иных аномалий (ложных тревог) зафиксировано не было. Для четырех других землетрясений аномалий не зафиксировано вовсе. Отмечено, что уровень сейсмической активности (в рабочем диапазоне магнитуд) в этих случаях позволяет уменьшить величину окна сглаживания. Расчет по меньшему в 2 раза окну (180 дней) позволил в ряде случаев выявить предвестники (аномалии), но при этом способствовал появлению дополнительных, ложных аномалий. *Выводы.* В целом подтверждено, что авторская методика подготовки данных и выбора параметров расчета, как, видимо, и сам метод LURR, имеют ограниченные возможности для трансляции на различные сейсмоактивные регионы нашей планеты. Причины этого могут быть самые разные, и ввиду неопределенности, зависящей от возможностей сети USGS во всех рассмотренных случаях, в данной работе этот вопрос не рассматривался.

Ключевые слова: сейсмичность, землетрясение, LURR, аномалия, прогноз

Medium-term earthquake forecasts by the LURR method on the example of the strongest earthquakes of the 21st century

Aleksander S. Zakupin, Natalya V. Boginskaya

Institute of Marine Geology and Geophysics, FEB RAS, 1B Nauki st., Yuzhno-Sakhalinsk 693022, Russia,
e-mail: a.zakupin@imgg.ru

Received 11.04.2022, accepted 20.07.2022

Aim. To carry out a retrospective forecast of the eight strongest earthquakes (with a magnitude greater than 8) of the 21st century using the Load/Upload Response Ratio (LURR) method. *Methods.* Calculations were performed according to the authors' original data processing technique, which had been successfully tested while studying the seismicity of Sakhalin Island. A significant advantage of this methodology consists in using fixed (basic) parameters of mathematical processing and sampling of calculated earthquakes (geometry of the calculation area and sequestration by magnitude). This enables researchers to conduct not only retrospective studies, but also real-time forecasting. In the present paper, a seismic catalog of the United States Geological Survey (USGS) was used. *Results.* For four of the considered earthquakes, precursors in the form of anomalies of the LURR parameter were identified. These anomalies had manifested themselves in periods from six months to two years before the earthquake, which is consistent with our results for Sakhalin. At the same time, no other anomalies (false alarms) were recorded in three cases. For the other four earthquakes, no anomalies were recorded at all. It is noted that the level of seismic activity (in the operating range of magnitudes) in these cases allows the smoothing window to be reduced. In some cases, the calculation for a window twice as small (180 days) revealed pre-

Для цитирования: Закупин А.С., Богинская Н.В. (2022) Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LURR на примере сильнейших землетрясений XXI столетия. *Литосфера*, 22(6), 872–881. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881>

For citation: Zakupin A.S., Boginskaya N.V. (2022) Medium-term earthquake forecasts by the LURR method on the example of the strongest earthquakes of the 21st century. *Lithosphere (Russia)*, 22(6), 872–881. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2022-22-6-872-881>

cursors, at the same time as contributing to the appearance of additional, false anomalies. *Conclusions.* It was confirmed that the authors' methodology for data preparation and calculation parameters selection, as well as the LURR method, apparently have limited possibilities for extrapolating to various seismically active regions of the planet. There may be different reasons, which have not been considered in the present paper due to the uncertainty associated with the capabilities of the USGS network.

Keywords: seismicity, earthquake, LURR, anomaly, forecast

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день существует немало методов прогноза землетрясений, однако их применение часто отличается скромными географией и глубиной ретроспективного анализа. Лишь немногие исследования могут претендовать на объективность в подходе выбора целей и периодов исследований. Одним из таких в российской практике является продолжительный эксперимент в реальном времени с методами M8 и MSc (Kossobokov, 2011). Как утверждает автор этой работы, данные Мировой сети обрабатывались каждые 6 мес., а результаты в режиме закрытого доступа публиковались на внутреннем сайте Института теории прогноза землетрясений (ИТПЗ) РАН. При этом даже при относительно скромной статистике целевых землетрясений (17 землетрясений с магнитудами больше 8) с 1992 по 2010 г. в работе (Kossobokov, 2011) нет сведений по всем землетрясениям, приведены лишь примеры. Судя по итоговым результатам данного эксперимента, представленным в журнале "Natural hazards" (Kossobokov, 2013), которые, по существу, уже 2 года до этого были опубликованы в России (Kossobokov, 2011), последними в цепочке успешных прогнозов стали землетрясения Чили (2010 г.) и Тохоку (2011 г.). Известно, что эксперимент продолжается в настоящее время.

С 2015 г. в Институте морской геологии и геофизики (ИМГиГ) ДВО РАН разрабатываются алгоритмы по использованию метода среднесрочного прогноза землетрясений LURR (Yin et al., 2001, 2006). Основной задачей является поиск возможности фиксации параметров обработки и характеристик расчетной выборки для выхода в дальнейшем на автоматические расчеты и реализации прогноза "вперед". Об этих исследованиях с 2016 г. мы написали ряд научных работ (Закупин и др., 2018, 2020). Если в них изучался ряд сильных сахалинских землетрясений (что и определяло расчетные периоды и локации – привязки к эпицентрам землетрясений), то в последней работе (Закупин, Богинская, 2021) расчетные выборки за период с 1997 по 2019 г. покрыли весь остров (всего 36). В упомянутой статье был проведен анализ предвестников (аномалий) на всей территории Сахалина в период действия сейсмической цифровой сети (начиная с 1997 г.). Если по отдельным силь-

ным землетрясениям результаты были убедительными (отсутствие ложных тревог и пропущенных целей, четко выраженный предвестник), то в последней статье (Закупин, Богинская, 2021) представлены уже более скромные результаты. Анализ землетрясений на о-ве Сахалин с 1997 по 2019 г. показал, что 17 из 19 (с $M \geq 5$) произошли в зонах, где в периоды не больше 3 лет до них были выявлены предвестники (аномалии LURR). Всего из 15 прогнозов 4 оказались ложными. Таким образом, 73% тревог оказались успешными для 89% землетрясений. В целом можно сказать, что по Сахалину исследование возможностей метода LURR проведено детально и на данном этапе завершено.

Возникает вопрос о применимости использованных алгоритмов реализации методики для других сейсмоактивных регионов планеты. В своей работе мы практически повторили путь наших коллег из Китая, которые в своем последнем обзоре (Yin et al., 2006) также ограничились прогнозами методом LURR для КНР (и в небольшой мере для США). Теперь настало время для проверки полученных результатов за пределами Сахалинской области. С одной стороны, нами получен хороший опыт в рамках одного небольшого региона. С другой стороны, возможности сахалинской сейсмической сети (с хорошей представительностью от магнитуды 3), конечно, не могут быть идентичны тем, которые имеются у сетей в других регионах. Также существуют региональные сейсмотектонические особенности, которые не гарантируют успешную трансляцию метода в различные регионы планеты. Детальное исследование отдельно взятого сейсмоактивного региона (как на Сахалине), которое требует затрат времени и ресурсов, на наш взгляд, преждевременно. Наиболее предпочтительными являются широкий охват (разные регионы), единая сеть данных и общий подход по выбору целей анализа. В данной работе рассматриваются восемь самых сильных и разрушительных землетрясений планеты, произошедших в XXI в. (по состоянию на 2021 г.). Подход к изучению данных методом LURR полностью сохранен (применяется авторская методика). Расчеты методом LURR проведены в эпицентральных областях рассматриваемых землетрясений с использованием каталога землетрясений Геологической службы США (United States Geological Survey – USGS, www.earthquake.usgs.gov).

ОБРАБОТКА ДАННЫХ И ИНСТРУМЕНТЫ АНАЛИЗА

Цели для прогноза и сейсмические каталоги

Как уже сказано, для анализа выбраны восемь сильнейших землетрясений XXI в. На рис. 1 представлена карта, на которой отмечены эпицентры выбранных землетрясений (ЗЛТ).

Землетрясение в Южном Перу с $Mw = 8.4$ произошло 23.06.2001 г. в 20:33 UTC. Оно нанесло серьезный ущерб нескольким прибрежным городам (75 человек погибли, имелись 2687 поврежденных и 17 510 разрушенных домов) и вызвало разрушительное цунами, волна которого достигала в некоторых пунктах высоты 7 м (Чепкунас, 2007). За ним последовало несколько крупных афтершоков, в том числе 26.06.2001 г. ($Mw = 6.7$) и 07.07.2001 г. ($Mw = 7.5$).

Мощное землетрясение с $Mw = 8.8$ произошло 27.02.2010 г. в Чили в 06:34 UTC. Подземные толчки были зафиксированы на глубине 23 км на расстоянии 150 км от столицы страны Сантьяго. Это землетрясение вызвало значительные разрушения, человеческие жертвы и цунами (Старовойт и др., 2010).

Япония 25.09.2003 г. в 19:50 UTC ощутила одно из самых сильных землетрясений за свою историю, которое получило название Токачи-Оки. Эпицентр располагался приблизительно в 100 км южнее о-ва Хоккайдо, магнитуда сейсмического события $Mw = 8.2$. Землетрясение вызвало цунами высо-

той до 4 м, наблюдались обширные повреждения, оползни. Имелись жертвы и раненые (755 человек) (Старовойт и др., 2009).

11.03.2011 г. у восточного побережья о-ва Хонсю в 05:46 UTC произошло еще более значительное сейсмическое событие с $Mw = 9.1$. Помимо колоссальных разрушений землетрясение вызвало цунами, волны которого нанесли существенный ущерб инфраструктуре 12 префектур. Есть жертвы и пропавшие без вести. Землетрясение получило название Тохоку из-за сильнейшего воздействия на регион Тохоку в Японии (Старовойт и др., 2011).

Не менее страшное землетрясение случилось 26.12.2004 г. в 00:58 UTC в 160 км западнее о-ва Суматра (Индонезия) с $Mw = 9.1$. В результате погибли 283 тыс. человек, 14 тыс. пропали без вести. Мощное цунами обрушилось на страны Индийского бассейна, его катастрофические последствия ощущались в 10 странах в Южной Азии и Восточной Африке (Чепкунас, 2007).

Ощутить печальные последствия мощного сейсмического события пришлось жителям Курильских островов 15.11.2006 г. Землетрясение произошло в 11:14 UTC восточнее о-ва Симушир на континентальном склоне в земной коре, магнитуда события $Mw = 8.3$. Из-за отсутствия населения на о-ве Симушир и о-ве Матуа ученым не удалось получить данные о сотрясениях на этих островах, остальные острова Курильской гряды в разной степени ощутили макросейсмический эффект. Землетрясение также вызвало волну цунами (Рогожин, Левина, 2013).

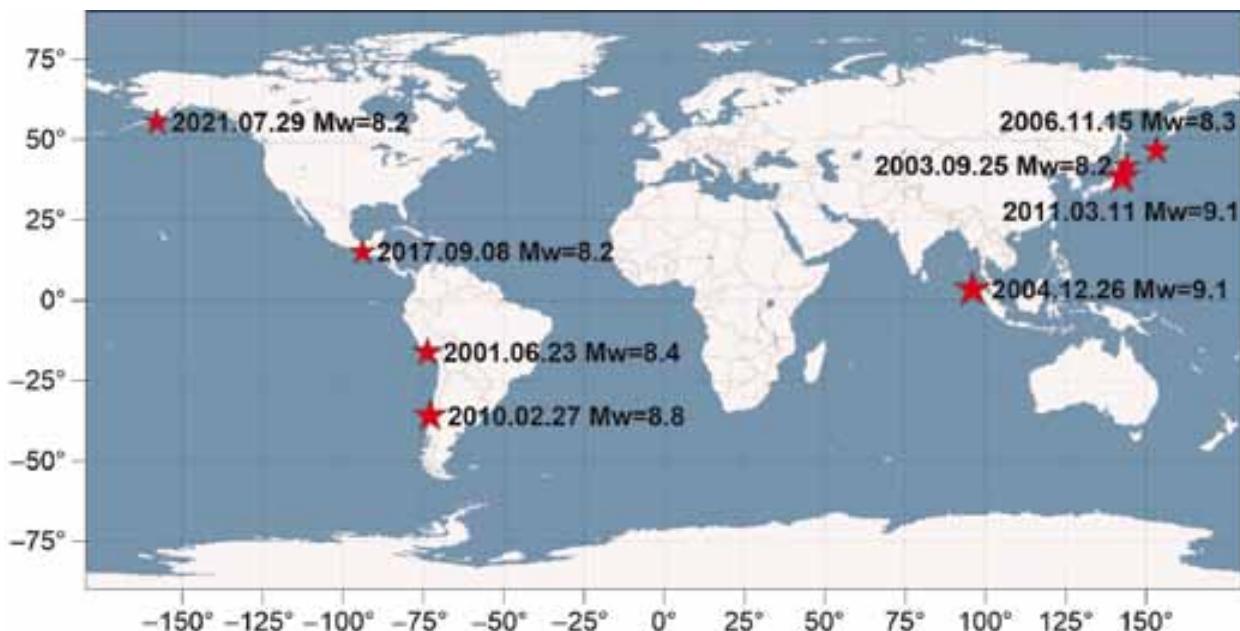


Рис. 1. Расположение сильнейших землетрясений XXI в. на карте мира с указанием дат и магнитуд.

Fig. 1. The location of the strongest earthquakes of the 21st century on the world map with dates and magnitudes.

Землетрясение в Мексике произошло 08.09.2017 г. в 04:49 UTC с $Mw = 8.2$. Эпицентр находился на южном побережье Мексики примерно в 100 км от прибрежного города Пихихьяпан. Землетрясение, к счастью, не вызвало цунами, но привело к человеческим жертвам и разрушениям (Старовойт и др., 2018).

Около побережья Аляски 29.07.2021 г. в 06:15 UTC было зафиксировано сейсмическое событие ($Mw = 8.2$). Это землетрясение стало сильнейшим в Северной Америке за последние 60 лет после Большого Аляскинского землетрясения, однако, к счастью, человеческих жертв и цунами установлено не было (Liu et al., 2022).

Для выполнения расчетов в данной работе использовались выборки из каталога землетрясений Геологической службы США. Выборка событий в круговой области (с центром в эпицентре сильного землетрясения) осуществлялась за несколько лет до землетрясения и включала в себя каждое описанное сильное сейсмическое событие.

Программы и методы обработки

Для анализа данных методом LURR применялся разработанный в ИМГиГ ДВО РАН программный комплекс Seis-ASZ (Закупин, 2016). Кратко напомним суть нашего подхода к выбору данных и их обработке. Исследуемая территория разбивается на расчетные области (окружности радиусом 1°) с некоторым шагом. Для Сахалина этот шаг был равен 0.5° по широте и долготе. В южном сегменте (с максимальной сейсмической активностью) расчеты проверялись при детализации через 0.1° , однако такая детализация была признана избыточной (Закупин, Богинская, 2021). В каждой расчетной области определяется количество землетрясений в рабочей выборке ($M = 3.3\text{--}5.0$), и оно накладывает ограничения на возможности дальнейшей математической обработки. В работе (Закупин, Богинская, 2021) отмечается, что расчеты возможны

при среднем количестве событий около 10–15 в год (меньшее количество при окне в 360 дней приводит к случайным выбросам). Расчет параметра LURR выполняется в полном соответствии с оригинальной методикой (Yin et al., 2001), при этом производится осреднение полученного результата во времени на окне в 360 дней с шагом 30 дней. Полученные распределения параметра проверяются на превышение порога, значение которого равно 3, для выявления аномалий (предвестников). В этой работе расчетные области брались только для эпицентров землетрясений (эпицентр является центром окружности) без сканирования в пространстве, а длина выборки из каталога составляла 5–7 лет (причем до проверяемого землетрясения не менее 3 лет). В табл. 1 приведена информация по всем расчетным областям.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

По результатам расчетов получены графики изменения параметра LURR, которые представлены на рис. 2. На них отмечены даты появления аномалий по первой точке пересечения порога (с учетом, что точки на графике – это середина окна сглаживания, т. е. с лагом в 6 мес.). Авторы метода (Yin et al., 2001, 2006) указывают, что фоновые значения параметра LURR находятся вблизи единицы, а увеличение значения свидетельствует об аномальном поведении. При этом насколько параметр должен увеличиться, не уточняется. Как показали наши исследования, порог можно установить опытным путем, но он, несомненно, будет зависеть от окна сглаживания. При окне в 360 дней аномалии хорошо отделимы от фона, если установлен порог не менее 3. Это значение мы и приняли в наших исследованиях. Также авторы метода (Yin et al., 2001, 2006) не считают принципиальным, когда заканчивается аномалия, т. е. значения вновь возвращаются к фону. В их работах имелись примеры, когда землетрясение происходило во время аномаль-

Таблица 1. Информация по объектам исследования (землетрясениям) и расчетным выборкам

Table 1. Information on research objects (earthquakes) and calculated samples

| Название/локация | Дата события | Координаты эпицентра | Mw | Расчетный период | Общее кол-во ЗЛТ в рабочей выборке | Среднее кол-во ЗЛТ в рабочей выборке за год |
|--------------------|--------------|----------------------|------|------------------|------------------------------------|---|
| Аляска/США | 29.07.2021 | 55.36 N, -157.88 W | 8.2 | 2016–2021 | 265 | 44 |
| Перу/Перу | 23.06.2001 | -16.26 S, -73.64 W | 8.4 | 1996–2002 | 160 | 23 |
| Токачи-Оки/Япония | 25.09.2003 | 41.82 N, 143.91 E | 8.2 | 2000–2004 | 256 | 51 |
| Чили/Чили | 27.02.2010 | -36.12 S, -72.89 W | 8.8 | 2005–2011 | 656 | 93 |
| Мексика/Мексика | 08.09.2017 | 15.02 N, -93.89 W | 8.2 | 2012–2018 | 692 | 99 |
| Симуширское/Россия | 15.11.2006 | 46.59 N, 153.26 E | 8.3 | 2001–2007 | 706 | 101 |
| Суматра/Индонезия | 26.12.2004 | 3.29 N, 95.98 E | 9.1 | 1999–2005 | 398 | 57 |
| Тохоку/Япония | 11.03.2011 | 38.29 N, 142.37 E | 9.1 | 2008–2012 | 1135 | 227 |

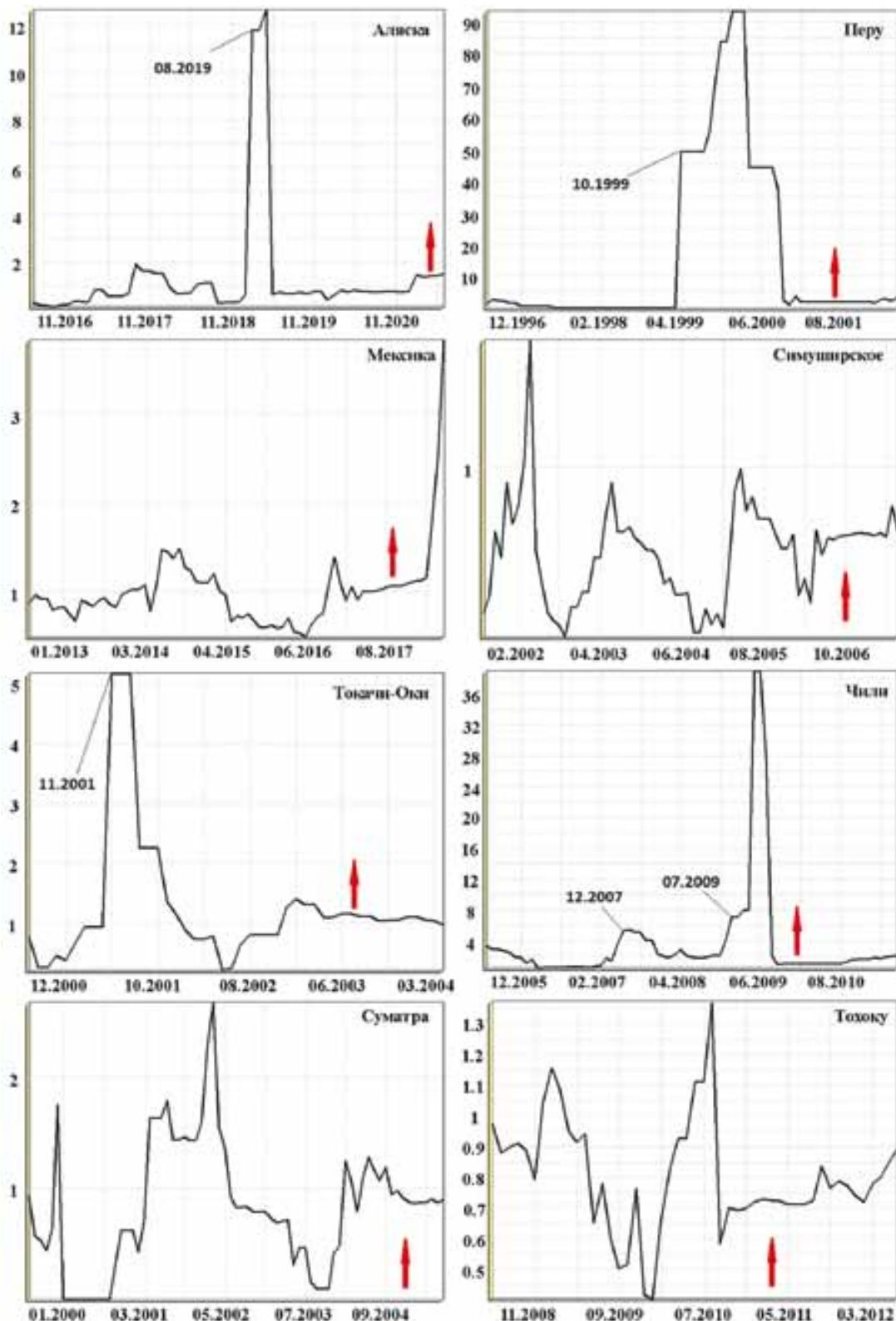


Рис. 2. Графики параметра LURR (при окне сглаживания 360 дней) для исследуемых землетрясений.
Здесь и на рис. 3, 4 стрелками указаны моменты возникновения землетрясений.

Fig. 2. Graphs of the LURR parameter (with a smoothing window of 360 days) for the studied earthquakes.
Here and in Fig. 3, 4 the arrows indicate the moments of occurrence of earthquakes.

ных значений LURR. Мы придерживаемся такого же мнения и фиксируем только точку входа в аномальный период. Справедливости ради стоит отметить, что в своих исследованиях мы всегда наблюдаем землетрясения уже после окончания формирования аномалии (скачка значений), т. е. после возврата в “фон”.

Условный порог для определения предвестников (аномалий), который ранее был принят нами в исследованиях (величина 3), в распределениях параметра LURR был превышен в пяти случаях для четырех землетрясений (Аляска, Перу, Токачи-Оки и Чили). В случае с Чили имеют место две аномалии. Для четырех землетрясений аномалий не зафиксировано.

В табл. 2 показаны результаты исследования с оценкой времени ожидания события с момента появления аномалии. Как видно, в трех первых случаях имеем дело с успешными ретроспективными прогнозами, т. е. единственный предвестник (отсутствуют ложные тревоги) появляется в период не более 2 лет до землетрясения. В случае с Чили одна аномалия (первая) является ложной, хотя стоит отметить, что она значительно меньше основной аномалии (ближайшей к целевому событию). Первая аномалия (ложная тревога) появилась в декабре 2007 г. за 27 мес. до цели прогноза, а вторая (предвестник) – за 7 мес. до события. Прогноз реализован, также зафиксирована первая ложная тревога.

Рассмотрим четыре оставшихся результата. Как видим, порог, равный 3, не преодолевается, т. е. аномалий фактически нет. В таком случае можно предположить, что это результат усреднения, и сделать попытку получить результаты на меньшем окне сглаживания. Это, конечно, уже является отклонением от нашей методики, которая разработана для Сахалина, однако на Сахалине за 22 года (с 1997 по 2019 г.) рабочие выборки не превышали 700 событий (в среднем 32 в год). В случае меньших окон на Сахалине при таком количестве землетрясений в расчетной выборке неизмен-

но появлялось большое количество ложных тревог. Для наших четырех случаев, где в среднем за год число расчетных землетрясений больше 57 (в случае Тохоку больше 200), эта идея не лишена смысла, тем более что подобный подход был применен в отношении сейсмичности Курильских островов и дал положительный результат (Закупин, Андреева, 2022). В работе (Закупин, Андреева, 2022) использовались окно в 180 дней (вместо 360) и шаг в 5 дней (вместо 30). Стоит применить эту модификацию в нашем случае.

На рис. 3 показаны графики изменения параметра LURR для всех четырех землетрясений. Как видно, на всех графиках есть вариации, которые превышают заданный порог. В случае с Мексикой результат остался тем же – это землетрясение является пропущенной целью. Здесь есть аномалия, которая идет в рост в конце расчетного периода, но ее рассмотрение не имеет смысла. Для Симуширского и Тохоку аномалии появляются перед целевыми событиями за 16 и 5 мес. соответственно, т. е. служат их предвестниками. Наконец, для Суматры выявлены три аномалии, причем каждая последующая сильнее предыдущей. Последняя аномалия в ноябре 2004 г. появилась за месяц до землетрясения, а первые две являются ложными тревогами.

Одним из важнейших вопросов остается также проблема ложных тревог. Могут ли появляться аномалии в “спокойное” время, т. е. когда сильное землетрясение не происходит. Для ответа на этот вопрос можно взять произвольно одно из представленных нами землетрясений и для него провести расчеты на периоде больше 5 лет. В качестве такого примера предлагается первое из восьми – землетрясение на Аляске. Увеличим период для расчета в 4 раза, т. е. начнем анализ не с 2016 г., а с 2000 г. На графике изменения параметра LURR на рис. 4 представлен расчет в круговой области с центром в эпицентре землетрясения на Аляске с 2000 по 2021 г. В результате расчета за 21 год выявлены четыре аномалии – в 2002, 2014, 2016 и 2019 гг.

Таблица 2. Результаты исследования

Table 2. Research results

| Название/локация | Дата события, Mw | Кол-во аномалий | Дата превышения порога, месяц и год | Период ожидания (прогноз), мес. |
|--------------------|------------------|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| Аляска/США | 29.07.2021, 8.2 | 1 | 08.2019 | 23 |
| Перу/Перу | 23.06.2001, 8.4 | 1 | 10.1999 | 20 |
| Токачи-Оки/Япония | 25.09.2003, 8.2 | 1 | 11.2001 | 22 |
| Чили/Чили | 27.02.2010, 8.8 | 2 | 12.2007, 07.2009 | 7 |
| Мексика/Мексика | 08.09.2017, 8.2 | 0 | – | – |
| Симуширское/Россия | 15.11.2006, 8.3 | 0 | – | – |
| Суматра/Индонезия | 26.12.2004, 9.1 | 0 | – | – |
| Тохоку/Япония | 11.03.2011, 9.1 | 0 | – | – |

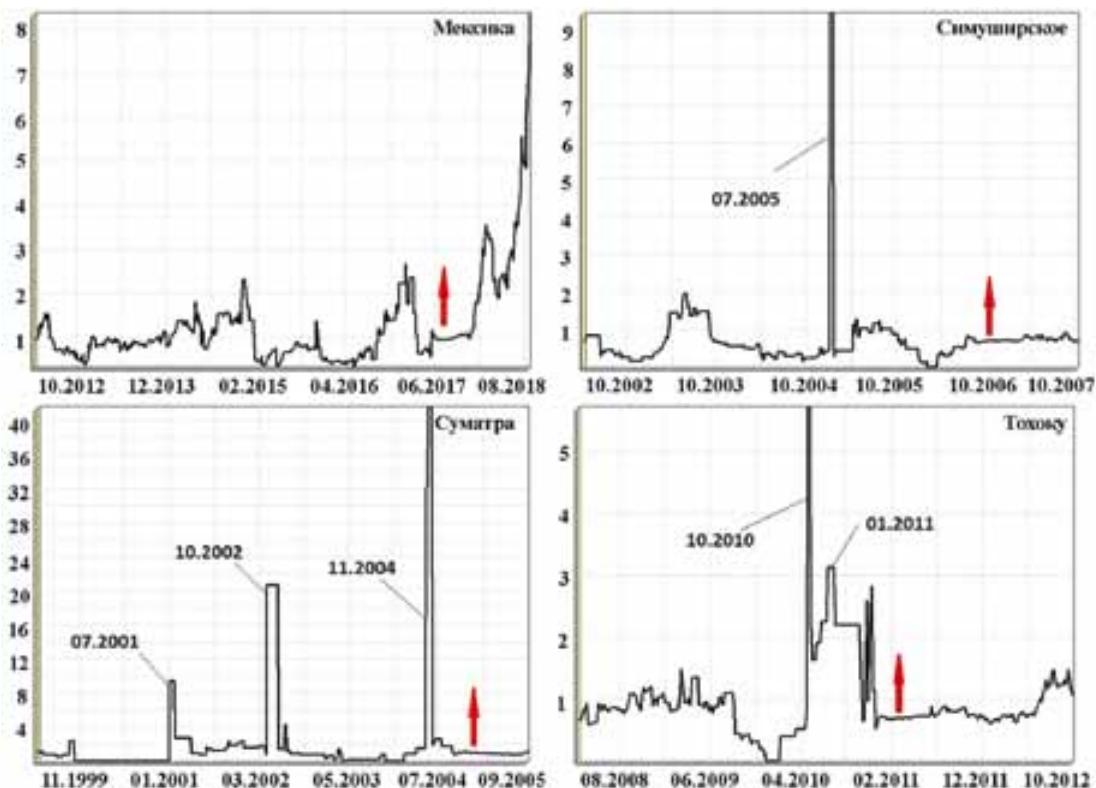


Рис. 3. Графики параметра LURR (при окне сглаживания 180 дней) для землетрясений Суматра, Мексика, Симуширское и Тохоку.

Fig. 3. Graphs of the LURR parameter (with a smoothing window of 180 days) for earthquakes Sumatra, Mexico, Simushirskoe and Tohoku.

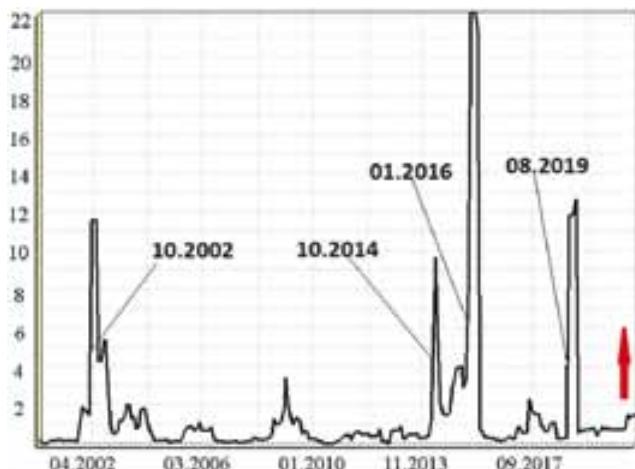


Рис. 4. График параметра LURR для землетрясения на Аляске с периодом расчета с 2000 по 2021 г.

Fig. 4. A graph of the LURR parameter for an earthquake in Alaska with a calculation period from 2000 to 2021.

Не лучший результат, так как в среднем аномалии появляются именно раз в 5 лет. Для полноты картины посмотрим на список землетрясений, которые произошли за этот период, например, с магнитудой больше 5.5. Таких землетрясений оказалось восемь, включая исследуемое Аляскинское (табл. 3).

Землетрясения № 1–4 – афтершоки Аляскинского землетрясения 2021 г. (№ 5). Землетрясение № 7 (его афтершок № 6) является, по-видимому, форшоком самого Аляскинского землетрясения, несмотря на то что GNSS-данные не показали значительного перекрытия этих двух разрывов (Liu et al., 2022). Согласно (Liu et al., 2022), Аляскинское землетрясение 2021 г. ($M = 8.2$) может быть продолжением разрыва, который обозначился в 1938 г. и имел такую же магнитуду. В то же время события 2020 и 2021 гг. близки по месту и пространству, а учитывая их магнитуды, считать их независимыми сложно. Принимая в расчет, что магнитуда первого ($M = 7.8$) позволяет считать его сильным, возникает вопрос: как соотнести аномалию LURR в августе 2019 г. (см. рис. 4) и землетрясения в 2020–2021 гг.? После аномалии именно первое землетрясение в 2020 г. ($M = 7.8$) было бы признано реа-

Таблица 3. Землетрясения в расчетной области Аляски с магнитудой больше 5.5 в период с 2000 по 2021 г.

Table 3. Earthquakes in the estimated area of Alaska with a magnitude greater than 5.5 in the period from 2000 to 2021

| № | °N | °E | Дата события | Время события | Mw |
|---|---------|-----------|--------------|---------------|-----|
| 1 | 54.9056 | -158.7149 | 31.10.2021 | 16:37 | 5.6 |
| 2 | 55.1767 | -157.6441 | 14.08.2021 | 11:57 | 6.9 |
| 3 | 55.3726 | -157.205 | 29.07.2021 | 06:23 | 5.9 |
| 4 | 55.8758 | -156.9924 | 29.07.2021 | 06:23 | 5.7 |
| 5 | 55.3635 | -157.8876 | 29.07.2021 | 06:15 | 8.2 |
| 6 | 54.7461 | -158.875 | 22.07.2020 | 06:20 | 5.6 |
| 7 | 55.0715 | -158.596 | 22.07.2020 | 06:12 | 7.8 |
| 8 | 55.3621 | -158.4417 | 31.05.2016 | 01:11 | 5.7 |

лизацией прогноза, так как произошло почти через год. Ответа на вопрос в данном случае нет, но есть рекомендация не снимать прогноз методом LURR в течение всего периода тревоги (2 года). Из списка осталось землетрясение № 8, которое произошло 31.05.2016 г. и как независимое событие имело магнитуду 5.7. Перед этим событием мы фиксируем аномалию в январе 2016 г. Что получено на выходе эксперимента? Во-первых, это ложная аномалия 2002 г. Аномалии 2014 и 2016 гг. – формально две отдельные, но произошли одна за другой. Время с октября 2014 г. до мая 2016 г. составляет меньше 2 лет, а потому они обе являются предвестниками землетрясения 2016 г. (попадают в период прогноза). Аномалия 2019 г. определяет опасный период до августа 2021 г., в течение которого произошли самые сильные землетрясения из выборки. Интересно на данном примере также оценить эффективность метода с позиций подхода, использованного в работе (Гусев, 1974). Если по конкретному методу прогноз выдается для одной и той же пространственной области и одного и того же энергетического диапазона, то эффективность J можно определить по следующей формуле:

$$J = N_+ \cdot T / (N \cdot T_{\text{alarm}}), \quad (1)$$

где N_+ – количество “ожидаемых” землетрясений, т. е. соответствующих успешному прогнозу; N – общее число произошедших землетрясений с параметрами (местоположение – энергия), соответствующими прогнозу; T_{alarm} – общее время тревоги, т. е. суммарная длительность всех прогнозов; T – общее время мониторинга сейсмической обстановки по рассматриваемому методу. Эффективность J показывает, во сколько раз количество спрогнозированных землетрясений превышает число попавших в тревожное время случайным образом. Очевидно, что при случайному угадывании эффективность J равна 1. В нашем случае при общем количестве землетрясений с магнитудами $M > 5.5$ (исключая афтершоки) $N = 3$ у № 5, 7, 8. Успешных прогнозов было 3 (N_+) – те же независимые зем-

летрясения, которые произошли в периоды тревоги после аномалий. Общий период наблюдения составил 252 мес. (21 год). Период тревоги авторами метода не был определен, а в расчете понятие “несколько лет” из (Yin et al., 2001) применить невозможно, поэтому возьмем значение 2 года как наиболее эффективное для сахалинских землетрясений (Закупин, Богинская, 2021). Время тревоги суммировалось по четырем аномалиям и составило 87 мес. (время тревоги по аномалиям 2014 и 2016 гг. перекрывается на 9 мес.). В итоге показатель J оказался равен 2.89, что означает в целом хороший результат.

Очевидно, что каждый случай и каждый сейсмоактивный район – это отдельная история, которая требует должной проработки, но не в рамках данной статьи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты работы (с фиксированными параметрами обработки, которые апробировались на примере Сахалина) свидетельствуют о средней для прогнозов эффективности, в четырех случаях из восьми – это успешные ретроспективные прогнозы, а в половине – их отсутствие (пропуски цели). На отдельно взятом примере (землетрясение 2021 г. на Аляске) расчеты параметра проведены на большей по отношению к начальной длительности выборке. Проведена оценка эффективности по методу А.А. Гусева. Результаты указывают на значительное отклонение от случайного распределения. Также для четырех неудачных случаев (пропусков цели) осуществлены дополнительные расчеты при меньшем окне сглаживания. В итоге для трех из четырех землетрясений появились предвестники, а в одном из этих трех случаев – ложные тревоги. По существу, этот результат улучшает общую статистику, но мы не стремимся развивать такой подход, так как он исключает автоматизацию при прогнозах в режиме реального времени (при ручной настройке усложняется алгоритм, требуется принять

тие ряда неочевидных решений). Именно фиксированные значения основных параметров для расчета позволили в начале 2022 г. начать на Сахалине мониторинг параметра LUUR в реальном времени. Результаты мониторинга в виде карт с зонами возможного возникновения землетрясений размещаются на закрытой интернет-платформе. Мы видим, что предложенная методика применения LUUR может проверяться в разных сейсмоактивных регионах мира и в каждом случае она имеет потенциал для использования при оценке возможности появления сильного (катастрофического) землетрясения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гусев А.А. (1974) Прогноз землетрясений по статистике сейсмичности. *Сейсмичность и сейсмический прогноз, свойства верхней мантии и их связь с вулканизмом на Камчатке*. (Отв. ред. С.А. Федотов). Новосибирск: Наука, 109-119.
- Закупин А.С. (2016) Программный комплекс для анализа неустойчивости сейсмического процесса. *Геоинформатика*, (1), 34-43.
- Закупин А.С., Андреева М.Ю. (2022) Особенности применения метода LUUR для анализа сейсмичности южных Курильских островов. *Тихоокеан. геология*, **41**(3), 37-49. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-3-37-49>
- Закупин А.С., Богинская Н.В. (2021) Среднесрочные прогнозы землетрясений методом LUUR на Сахалине: обобщение ретроспективных исследований за 1997–2019 гг. и новые подходы. *Геосистемы переходных зон*, **5**(1), 27-45. <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045>
- Закупин А.С., Богомолов Л.М., Богинская Н.В. (2020) Последовательное применение методов анализа сейсмических последовательностей LUUR и СРП для прогноза землетрясений на Сахалине. *Геофизические процессы и биосфера*, **19**(1), 66-78. <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
- Закупин А.С., Левин Ю.Н., Богинская Н.В., Жердева О.А. (2018) Развитие методов среднесрочного прогноза на примере Онорского землетрясения на Сахалине ($M_w = 5.8$, 14 августа 2016 г.). *Геология и геофизика*, **59**(11), 1904-1911. <https://doi.org/10.15372/gig20181112>
- Рогожин Е.А., Левина В.И. (2013) Симуширские землетрясения 15 ноября 2006 г. (I) и 13 января 2007 г. (II) с $M_w = 8.3$ и $M_w = 8.1$ (Средние Курилы). *Землетрясения Северной Евразии. 2007 г.* (Отв. ред. О.Е. Старовойт). Обнинск: ГС РАН, 326-338.
- Старовойт О.Е., Михайлова Р.С., Рогожин Е.А., Чепкунас Л.С. (2009) Северная Евразия. *Землетрясения Северной Евразии*. (Отв. ред. О.Е. Старовойт). Обнинск: ГС РАН, 11-28.
- Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Коломиец М.В. (2010) Сейсмичность в первом полугодии 2010 г. *Земля и Вселенная*, (6), 98-107.
- Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Коломиец М.В. (2011) Сейсмичность в январе–июне 2011 г. *Земля и Вселенная*, (6), 102-106.
- Старовойт О.Е., Чепкунас Л.С., Коломиец М.В. (2018) Сейсмичность Земли во втором полугодии 2017 г. *Земля и Вселенная*, (3), 107-112.
- Чепкунас Л.С. (2007) Сейсмичность земли по телесейсмическим данным. *Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных*. II Междунар. сейсмолог. школа. Пермь: ГС РАН, 213-217.
- Kossobokov V.G. (2011) Are mega earthquakes predictable? *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **47**(8), 951-996. <https://doi.org/10.1134/S0001433811080032>
- Kossobokov V.G. (2013) Earthquake prediction: 20 years of global experiment. *Natural Hazards*, **69**(2), 1155-1177. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0198-1>
- Liu C., Lay T., Xiong X. (2022) The 29 July 2021 MW 8.2 Chignik, Alaska Peninsula Earthquake Rupture Inferred from Seismic and Geodetic Observations: Re-rupture of the Western 2/3 of the 1938 Rupture Zone. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL096004. <https://doi.org/10.1029/2021GL096004>
- Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. (2001) Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LUUR) theory. *Pure Appl. Geophys.*, **157**(11/12), 2365-2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29
- Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. (2006) LUUR's twenty years and its perspective. *Pure Appl. Geophys.*, **163**, 2317-2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>

REFERENCES

- Chepkunas L.S. (2007) Seismicity of the earth according to telesismic data. *Modern methods of processing and interpretation of seismological data*. Abstracts of the II International Seismological Workshop. Perm, GS RAN, 213-217. (In Russ.)
- Gusev A.A. (1974) Earthquake forecast according to seismicity statistics. *Seismicity and seismic forecast, properties of the upper mantle and their connection with volcanism in Kamchatka*. (Ed. by S.A. Fedotov). Novosibirsk, Nauka Publ., 109-119. (In Russ.)
- Kossobokov V.G. (2011) Are mega earthquakes predictable? *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, **47**(8), 951-996. <https://doi.org/10.1134/S0001433811080032>
- Kossobokov V.G. (2013) Earthquake prediction 20 years of global experiment. *Natural Hazards*, **69**(2), 1155-1177. <https://doi.org/10.1007/s11069-012-0198-1>
- Liu C., Lay T., Xiong X. (2022) The 29 July 2021 MW 8.2 Chignik, Alaska Peninsula Earthquake Rupture Inferred from Seismic and Geodetic Observations: Re-rupture of the Western 2/3 of the 1938 Rupture Zone. *Geophys. Res. Lett.*, **49**, e2021GL096004. <https://doi.org/10.1029/2021GL096004>
- Rogozhin E.A., Levina V.I. (2013) Simushir earthquakes of November 15, 2006 (I) and January 13, 2007 (II) with $M_w = 8.3$ and $M_w = 8.1$ (Middle Kuriles). *Earthquakes of the Northern Eurasia. 2007*. (Ed. by O.E. Starovoi). Obninsk, GS RAS, 326-338. (In Russ.)
- Starovoi O.E., Mikhailova R.S., Rogozhin E.A., Chepkunas L.S. (2009) Northern Eurasia. *Earthquakes of the*

- Northern Eurasia. (Ed. by O.E. Starovoit). Obninsk, GS RAS, 11-28. (In Russ.)
- Starovoit O.E., Chepkunas L.S., Kolomiets M.V. (2010) Seismicity in the first half of 2010. *Zemlya i Vselennaya*, (6), 98-107. (In Russ.)
- Starovoit O.E., Chepkunas L.S., Kolomiets M.V. (2011) Seismicity in January-June 2011. *Zemlya i Vselennaya*, (6), 102-106. (In Russ.)
- Starovoit O.E., Chepkunas L.S., Kolomiets M.V. (2018) Seismicity of the Earth in the second half of 2017. *Zemlya i Vselennaya*, (3), 107-112. (In Russ.)
- Yin X.C., Wang Y.C., Peng K.Y., Bai Y.L., Wang H.T., Yin X.F. (2001) Development of a new approach to earthquake prediction: The Load/Unload Response Ratio (LURR) theory. *Pure Appl. Geophys.*, **157**(11/12), 2365-2383. https://doi.org/10.1007/978-3-0348-7695-7_29
- Yin X.C., Zhang L.P., Zhang H.H., Yin C., Wang Y., Zhang Y., Peng K., Wang H., Song Z., Yu H., Zhuang J. (2006) LURR's twenty years and its perspective. *Pure Appl. Geophys.*, **163**, 2317-2341. <https://doi.org/10.1007/s00024-006-0135-x>
- Zakupin A.S. (2016) Program complex for the analysis of instability of seismic process. *Geoinformatika*, (1), 34-43. (In Russ.)
- Zakupin A.S., Andreeva M.Yu. (2022) Application of the LURR method to study seismicity of the Southern Kuril Islands. *Tikhookean. Geol.*, **41**(3), 37-49. (In Russ.) <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2022-41-3-37-49>
- Zakupin A.S., Boginskaia N.V. (2021) Mid-term earthquake prediction using the LURR method on Sakhalin Island: A summary of retrospective studies for 1997–2019 and new approaches. *Geosistemy Perekhodnykh Zon*, **5**(1), 27-45. (In Russ.) <https://doi.org/10.30730/gtrz.2021.5.1.027-045>
- Zakupin A.S., Bogomolov L.M., Boginskaia N.V. (2020) Application of methods of analysis of seismic sequences SDP and LURR for earthquake prediction on Sakhalin. *Geofizicheskie Protsessy i Biosfera*, **19**(1), 66-78. (In Russ.) <https://doi.org/10.21455/GPB2020.1-4>
- Zakupin A.S., Levin Yu.N., Boginskaia N.V., Zherdeva O.A. (2018) Development of medium-term prediction methods: A case study of the august 14, 2016 Onor (Mw = 5.8) earthquake on Sakhalin. *Russ. Geol. Geophys.*, **59**(11), 1904-1911. <https://doi.org/10.15372/gig20181112>